На правах рукописи

Плотникова Инна Васильевна

ДИНАМИКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ВИБРАЦИОННОГО АЗИМУТАЛЬНОГО МОДУЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ

Специальность 01.02.06 – "Динамика, прочность, машин, приборов и аппаратуры"

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена на кафедре «Точного приборостроения» Томского политехнического университета

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор В.И.Копытов
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Ю.А. Бурьян
	член-корреспондент МАН ВШ, доктор технических наук, профессор Г.Г. Волокитин

Ведущая организация - Институт Машиноведения РАН, г. Москва

Защита состоится « ____ » июня 2002 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета К 063.80.04 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина,30, учебный корпус №4, ауд.210.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «____» мая 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

С.В.Кирсанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

<u>Актуальность работы.</u> В настоящее время благодаря высокому уровню развития науки и техники создано большое количество разнообразных и совершенных систем ориентации (СО).

В зависимости от их назначения и условий эксплуатации, предъявляются определенные требования к СО, которые должны быть воплощены в реальную конструкцию прибора, это: вес и габариты; стоимость; сложность; пригодность для серийного изготовления; время готовности к действию; срок службы и др.

В настоящее время получают применение новые типы гироскопов, такие как лазерные, волоконно-оптические, твердотельные волновые и другие, на которых строятся бесплатформенные системы ориентации. Это позволяет уменьшить массогабаритные характеристики систем ориентации, но стоимость их не уменьшается, а чаще всего наоборот увеличивается.

В настоящее время, наряду с традиционными (в основном военными) областями использования СО появляется необходимость их применения для решения таких задач как инклинометрия, мониторинг магистральных трубо-проводов, управление безлюдными транспортными средствами, маркшейдерские, горные работы и др. Поэтому современного потребителя СО интересуют в первую очередь такие их характеристики, как стоимость, массогабаритные данные, время готовности.

Кроме того, в процессе эксплуатации практически всегда в месте установки СО присутствуют механические возмущения – поступательная или угловая вибрация, которые обычно оказывают отрицательное влияние на измерительные приборы. В настоящее время не создано малогабаритных быстродействующих компасных систем, которые удовлетворительно работали бы при вибрации основания.

Поэтому задача разработки принципов построения и исследование малогабаритной, быстродействующей компасной системы, работающей в условиях наличия знакопеременных возмущений, которой посвящена данная работа, является актуальной.

Большое внимание в настоящее время уделяется вибрационным гироскопам, которые могут быть реализованы в виде сверхминиатюрных микромеханических гироскопов.

Успешное решение вопросов гирокомпасирования (с помощью вибрационного гироскопа), которое исследуется в данной работе, открывает возможность создания компасных систем с малыми габаритами, весом, временем готовности и стоимостью.

Цель и основные задачи диссертационной работы.

Цель работы состояла в разработке и исследовании миниатюрного быстродействующего азимутального модуля, построенного на основе вибрационного гироскопа и способного работать при угловой и поступательной вибрации основания. Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Разработка схем азимутального канала на вибрационных гироскопах с низкой и высокой частотой возбуждения, оценка влияния частоты на динамические характеристики азимутального модуля.

2. Составление математических моделей рассматриваемых схем азимутальных модулей.

3. Разработка алгоритмов определения азимута при геометрическом и аналитическом способах построения плоскости горизонта.

4. Определение влияния несоответствия расчетных и реальных параметров азимутальных модулей на их точностные характеристики.

5. Анализ влияния некоторых технологических погрешностей на точность азимутального модуля, разработка способов повышения его точности.

6. Анализ динамики азимутального модуля при наличии поступательной и угловой вибрации основания.

7. Разработка способов обработки первичной информации, обеспечивающих работоспособность системы при поступательной и угловой вибрации основания.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны принципы построения канала аналитического компасирования на основе вибрационного гироскопа.

2. Разработаны алгоритмы определения азимута и географической широты местонахождения объекта для трех типов чувствительных элементов (низкочастотный LR-типа, высокочастотный LR и LL типа) при геометрическом и аналитическом способах горизонтирования их измерительных осей.

3. Определены основные методические и инструментальные погрешности системы и способы их уменьшения.

4. Разработан способ обработки выходных сигналов чувствительных элементов, обеспечивающий работоспособность системы при поступательной и угловой вибрации основания.

<u>Достоверность</u> полученных в диссертации результатов и обоснованность научных положений подтверждается:

- применением современных методов исследований;

- корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью;

- результатами компьютерного эксперимента.

Практическая ценность. Применение предложенных схем азимутального модуля позволяет создать быстродействующую, бескарданную СО малой стоимости, уменьшая при этом массогабаритные характеристики. Выводы и рекомендации, полученные в работе, использованы при выполнении «Ползуновского гранта» в области технических наук ВУЗов Министерства общего и профессионального образования России на тему «Внедрение автономной системы пространственной ориентации подземного угольного комбайна», при разработке СО пространственного положения скважины на предприятии ОАО «Геофит», г. Томск.

На защиту выносятся следующие основные положения:

 принципы построения миниатюрного быстродействующего азимутального модуля на основе вибрационного гироскопа;

– алгоритмы определения азимута при геометрическом и аналитическом способах построения плоскости горизонта;

- теория погрешностей различных схем азимутальных модулей;

– способы повышения быстродействия азимутального модуля;

– способы обеспечения работоспособности азимутальных модулей при вибрации основания.

<u>Методы исследований</u>. К основным методам, используемым при выполнении диссертационной работы, относятся аппарат линейной алгебры, теория дифференциальных уравнений, методы математического моделирования. Теоретические исследования проводились на основе положений теоретической механики, теории колебаний, теории гироскопов.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались: на The 3th International Symposium «SIBCONVERS-99», г. Томск, 1999; Российской научно-технической конференции «Новейшие технологии в приборостроении», г. Томск, 1999; Международной научно-технической конференции «Приборы и системы ориентации и навигации», г. Москва, 1998; The Second Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS-98), г. Томск, 1998; 2-й Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов, машин», г. Омск, 1997; Молодежной научной конференции «XXIII Гагаринские чтения», г.Москва,1997; Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация», Г.Барнаул, 2000; 4-ой Российской научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии» (HO-2001) г. Санкт-Петербург, 2001; VII-ой Международной научнотехнической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г.Воронеж; Тhe 5th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS-2001), г. Томск, 2001; на семинарах кафедры Точного приборостроения Томского политехнического университета.

<u>Публикации.</u>

По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемых литературных источников. Работа содержит 165 страниц основного машинописного текста, из которых 64 рисунков и 7 таблиц. Список используемых литературных источников состоит из 101 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность вопросов, рассматриваемых в диссертационной работе.

<u>В первой главе</u> приведен обзор существующих СО объектов по отношению к географически ориентированной системе координат. Такие системы состоят, как правило, из двух каналов: азимутального и горизонтального. Если реализация последнего из них не представляет трудностей на современном этапе, то существующие устройства, определяющие азимут объекта, не смотря на их многообразие, имеют существенные недостатки в виде больших габаритов и времени готовности, высокой стоимости и невозможности работы даже при относительно низких уровнях вибрации.

Показано, что одним из перспективных направлений современной гироскопии являются вибрационные гироскопы.

Сформулированы цель и основная идея работы, указываются основные научные положения, выносимые на защиту.

<u>Во второй главе</u> рассмотрена СО с низкочастотным азимутальным модулем. Предлагаемая система ориентации состоит из маятника и двухосного вибрационного гироскопа, объединенных в единое устройство (рис.1). По сигналам, поступающим с гироскопа, осуществляется аналитическое гиро-



Рис. 1 Схема системы ориентации

компасирование.

СО состоит из чувствительного элемента (ЧЭ), внутри которого находится инерционное тело 3, соединенное с вибровозбудителем упругой связью 2. ЧЭ представляет собой двухкоординатный физический маятник, установленный в корпусе с помощью двухосного карданового подвеса 6, 8. На осях подвеса ЧЭ установлены датчики 7, 9 его углов отклонения относительно корпуса. ЧЭ упругую имеет

связь 4, 5 с корпусом. Данные упругие связи малы и наличие их обусловлено: необходимостью подстройки системы в резонанс; упругим подвесом (при малости углов отклонения объекта от плоскости горизонта).

В рабочем режиме инерционное тело 3 под действием сил, создаваемых вибровозбудителем 1, совершает прямолинейные, гармонические колебания по закону $z = z_0 \sin \omega t$ относительно корпуса 10 ЧЭ.

Помимо относительного движения, инерционное тело 1 также участвует в переносном движении вместе с Землей в ее суточном вращении вокруг своей оси с угловой скоростью Ω_3 . В результате этого возникают кориолисовы силы, которые вызывают угловые колебания ЧЭ вокруг его осей подвеса. Частота этих колебаний чувствительного элемента равна частоте поступательных колебаний инерционного тела, а амплитуды колебаний пропорциональны в основном проекциям горизонтальной составляющей скорости вращения Земли на оси подвеса ЧЭ.

При отклонении объекта относительно плоскости горизонта с датчиков 7,9 будут сниматься напряжения, пропорциональные углам отклонения ЧЭ относительно корпуса $\Theta(t) = \overline{9} + \vartheta(t)$, $\Psi(t) = \overline{\psi} + \psi(t)$. Составляющие $\overline{9}, \overline{\psi}$ обусловлены отклонением объекта относительно плоскости горизонта и эти составляющие в показаниях датчиков угла 7,9 равны углам ориентации δ, γ объекта относительно плоскости горизонта. Переменные составляющие $\vartheta(t), \psi(t)$ с частотой ω обусловлены действием на ЧЭ моментов сил Кориолиса за счет суточного вращения Земли и колебаний инерционного тела 3. Амплитудные значения ϑ_0 и ψ_0 переменных составляющих сигналов датчиков угла, как показали исследования, зависят от азимута объекта.

Сигналы с датчиков угла 7,9 поступают в вычислительное устройство (ВУ), которое, используя фильтрацию сигналов, разделяет постоянные и переменные составляющие и по ним вычисляет параметры ориентации объекта относительно плоскости горизонта - δ , γ и плоскости географического меридиана - α , а также географическую широту ϕ местонахождения объекта и формирует управляющий сигнал U_{PH} для автоматической резонансной настройки системы.

Уравнения движения ЧЭ имеют вид

$$\begin{split} J_{C} &= H \$ + \mu_{1} \And + k_{1} \psi = -F \cos \alpha \cos \omega t + c_{1} \gamma + \mu_{1} \And - J_{c} \And \cos \alpha + \\ &+ J_{C} \And \sin \alpha - D \$ \And + D_{1} \vartheta \And - 2m_{1} z \And \Omega_{r} \cos \alpha - 2m_{1} (z + \lambda) (\And \cos \alpha + \And \sin \alpha + \checkmark) \And - \\ &- m_{1} (z + \lambda) (\And_{X} - \And_{Z} \psi - v_{Z} \And); & (1) \\ J_{B} &= H \And + \mu_{2} \And + k_{2} \vartheta = -F \sin \alpha \cos \omega t + c_{2} \delta + \mu_{2} \And - J_{B} \And \cos \alpha - \\ &- J_{B} &\implies \alpha + D \And \And + D_{1} \psi \And - 2m_{1} z \And \Omega_{r} \sin \alpha - 2m_{1} (z + \lambda) (\And \cos \alpha + \And \sin \alpha + \And) \And - \\ &- m_{1} (z + \lambda) (\And_{Y} - \And_{Z} \vartheta - v_{Z} \And); & \\ &m_{1} &\iff v \And + k_{3} z = N(t) + m_{1} \And_{Z} + m_{1} (\Omega_{Y} v_{X} + \Omega_{X} v_{Y}) + m_{1} (\And_{X} \psi - \And_{Y} \psi) + \\ &+ 2m_{1} v_{X} \checkmark + m_{1} (z + \lambda) (\checkmark^{2} + \And^{2}), \end{split}$$

где
$$J_B = J_{U_{\partial X}} + J_X + m_1(z + \lambda)^2 + m_{U_{\partial}}\lambda^2$$
,
 $J_C = J_{HKY} + J_{U_{\partial Y}} + J_Y + m_1(z + \lambda)^2 + m_{U_{\partial}}\lambda^2$,
 $D = J_{U_{\partial Y}} + J_Y + J_{U_{\partial X}} + J_X + 2m_1(z + \lambda)^2 + 2m_{U_{\partial}}\lambda^2 - J_{U_{\partial Z}} - J_Z$,
 $D_1 = J_{U_{\partial Y}} + J_Y + J_{U_{\partial X}} + J_X + m_1(z + \lambda)^2 + m_{U_{\partial}}\lambda^2 - J_{U_{\partial Z}} - J_Z$,
 $H = D\Omega_3 \sin \alpha$, $\Omega_{\Gamma} = \Omega_3 \cos \phi$, $F = 2m\lambda z_0 \omega \Omega_3 \cos \phi$,
 $k_1 = c_1 + mg(\lambda + z)$, $k_2 = c_2 + mg(\lambda + z)$, $m = m_1 + m_{U_{\partial}}$,

 $\Omega_{\rm X} = \Omega_3 \cos\varphi \sin\alpha + \mathscr{S}\cos\alpha + \mathscr{S}\sin\alpha \,, \quad \Omega_{\rm Y} = \Omega_3 \cos\varphi \cos\alpha + \mathscr{S}\cos\alpha - \mathscr{S}\sin\alpha \,.$

Здесь использованы следующие обозначения $J_{4,9X}$, $J_{4,9Y}$, $J_{4,9Z}$, J_{HKY} , J_X , J_Y , J_Z - моменты инерции различных элементов модуля относительно соответствующих осей; $m_{4,9}$, m_1 - массы элементов модуля; λ - длина маятника; c_1 , c_2 - угловые жесткости упругих связей 4, 5; k_3 - жесткость упругой связи 2; v_X, v_Y, v_Z - скорости поступательных колебаний основания; $N(t) = N_0 \sin \omega t$ - сила, создаваемая вибровозбудителем.

Система уравнений (1) представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

Так как вибровозбудитель имеет достаточную мощность, то движение инерционного тела практически не искажается угловым и поступательным движением объекта, поэтому его можно рассматривать отдельно. Как видно из (1), колебания ЧЭ вокруг его осей подвеса взаимосвязаны между собой через гироскопические моменты $D\Omega_3 \sin \varphi \cdot \mathscr{G}$ и $D\Omega_3 \sin \varphi \cdot \mathscr{G}$ за счет вертикальной составляющей скорости вращения Земли, а также зависят от параметров угловой и поступательной вибрации основания.

Исследование динамики азимутального канала требует знания собственных частот системы, для определения которых рассматривается однородная линеаризованная система уравнений, описывающих собственное движение. Получены выражения для трех собственных частот системы

$$\omega_{1,2}^{2} = \frac{H^{2} + (k_{1}J_{B} + k_{2}J_{C}) \pm \sqrt{[H^{2} + (k_{1}J_{B} + k_{2}J_{C})]^{2} - 4J_{B}J_{C}k_{1}k_{2}}}{2J_{B}J_{C}}, \qquad (2)$$
$$\omega_{3} = \sqrt{k_{3}/m}.$$

В выражении (2) величина H, характеризующая перекрестные связи между каналами ЧЭ, намного меньше остальных слагаемых, поэтому при расчете собственных частот ею можно пренебречь. Тогда первые две собственные частоты ЧЭ практически равны его парциальным частотам, то есть $\omega_1^2 \approx k_1/J_C$ и $\omega_2^2 \approx k_2/J_B$.

В результате поступательных колебаний инерционного тела относительно корпуса ЧЭ, положение центра масс ЧЭ изменяется по закону $\lambda + z_0 \sin \omega t$. Следовательно, движение ЧЭ описывается уравнениями с периодическими коэффициентами. В таких системах возможно возникновение параметрического резонанса. Однако, в результате наличия в системе сил вязкого трения и при возбуждении колебаний инерционного тела на резонансной частоте ЧЭ, параметрический резонанс может возникнуть только при большой величине амплитуды z_0 . Параметры прибора таковы, что параметрический резонанс не возникает.

При отсутствии угловой и поступательной вибрации основания уравнения движения ЧЭ имеют вид

$$J_{C} \mathscr{A} + H \mathscr{A} + \mu_{1} \mathscr{A} + k_{1} \psi = -F \cos \alpha \cos \omega t - 2m_{1} z \mathscr{A} \Omega_{\Gamma} \cos \alpha - 2m_{1} \mathscr{A} \mathscr{A} (\lambda + z);$$

$$J_{B} \mathscr{A} - H \mathscr{A} + \mu_{2} \mathscr{A} + k_{2} \vartheta = -F \sin \alpha \cos \omega t - 2m_{1} z \mathscr{A} \Omega_{\Gamma} \sin \alpha - 2m_{1} \mathscr{A} (\lambda + z).$$
(3)

Моменты сил Кориолиса, вызывающие колебания ЧЭ вокруг его осей подвеса, малы, следовательно, малы и углы ψ и 9 колебаний ЧЭ. Таким образом, для определения амплитуд основного информационного движения ЧЭ, происходящего с частотой ω колебаний инерционного тела, нелинейные члены не учитываются и решение системы (3) ищется по виду их правых частей

$$\psi(t) = A\cos\omega t + B\sin\omega t = \psi_0 \sin(\omega t + \varphi_1);$$

$$\vartheta(t) = M\cos\omega t + N\sin\omega t = \vartheta_0 \sin(\omega t + \varphi_2).$$
(4)

Используя метод неопределенных коэффициентов, амплитуды вынужденных колебаний ЧЭ получены в виде

$$\begin{split} &\Delta = (J_{C}\omega^{2} - k_{1})(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) - 2H^{2}\omega^{2}(J_{C}\omega^{2} - k_{1})(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) + \\ &+ \mu^{2}\omega^{2}[(J_{C}\omega^{2} - k_{1})(J_{B}\omega^{2} - k_{2})^{2} - \omega^{2}H^{2}(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) + \mu^{2}\omega^{2}(J_{C}\omega^{2} - k_{1})] \\ &A = \frac{[(J_{C}\omega^{2} - k_{1})(J_{B}\omega^{2} - k_{2})^{2} - \omega^{2}H^{2}(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) + \mu^{2}\omega^{2}(J_{C}\omega^{2} - k_{1})]}{\Delta} \\ &F\cos\alpha - \\ &- \frac{H\mu\omega^{2}[(J_{C} + J_{B})\omega^{2} - (k_{1} - k_{2})^{2}]}{\Delta} F\sin\alpha; \\ B = -\frac{\mu\omega(J_{B}\omega^{2} - k_{2})^{2} - H^{2}\omega^{3}\mu + \mu^{3}\omega^{3}}{\Delta} F\cos\alpha - \\ &- \frac{H\omega[(J_{C}\omega^{2} - k_{1})(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) + H\mu^{2}\omega^{3} + H^{3}\omega^{3}]}{\Delta} F\sin\alpha; \\ M = \frac{H\mu\omega^{2}[(J_{C}\omega^{2} - k_{1})(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) + H\mu^{2}\omega^{2}(J_{C}\omega^{2} - k_{1})]}{\Delta} F\cos\alpha + \\ &+ \frac{(J_{C}\omega^{2} - k_{1})^{2}(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) - H^{2}\omega^{2}(J_{C}\omega^{2} - k_{1}) + \mu^{2}\omega^{2}(J_{B}\omega^{2} - k_{2})}{\Delta} F\sin\alpha; \\ N = \frac{H\omega[(J_{C}\omega^{2} - k_{1})(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) - \omega^{2}(H^{2} + \mu^{2})]}{\Delta} F\cos\alpha - \\ &- \frac{\mu\omega[(J_{C}\omega^{2} - k_{1})^{2}(J_{B}\omega^{2} - k_{2}) - \omega^{2}(H^{2} + \mu^{2})]}{\Delta} F\sin\alpha. \end{split}$$

Из выражений (5) видно, что амплитуды колебаний ЧЭ зависят как от sin, так и соз угла α.

Силы Кориолиса, вызывающие колебания ЧЭ вокруг его осей подвеса малы, соответственно малы и амплитуды колебаний ЧЭ. Для повышения

точности вычисления азимута необходимо увеличивать амплитуды вынужденных колебаний ЧЭ. Этого можно добиться при резонансной настройке системы, которая заключается в следующем: во-первых, параметры системы необходимо выбирать таким образом, чтобы все собственные частоты системы были равны между собой $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_0$; во-вторых, частота ω колебаний инерционного тела должна быть равна частоте ω_0 ; в-третьих, для увеличения амплитуд колебаний ЧЭ необходимо увеличивать скорость ($z_0 \cdot \omega$) колебаний инерционного тела и увеличивать добротность колебательной системы.

<u>В третьей главе</u> на основе анализа вынужденного движения ЧЭ разработаны алгоритмы определения азимутального угла низкочастотным азимутальным модулем. ЧЭ совершает движение в картинной плоскости по эллиптической траектории. Учитывая, что эллипс сильно вытянут, можно предложить один из самых простых алгоритмов

$$\alpha_{\rm pl} = \pi k \pm \arctan(\theta_0 / \psi_0) \quad , \tag{6}$$

где k = 0,1,2 определяется в зависимости от величины фазового сдвига ε_1 между колебаниями ЧЭ вокруг его осей подвеса.

Более точное вычисление азимутального угла можно получить, используя алгоритм

$$\alpha_{p2} = \pi k \pm \arctan\left[\cos\varepsilon \frac{2\vartheta_0/\psi_0}{\left[1 - \left(2\vartheta_0/\psi_0\right)^2\right]}\right],\tag{7}$$

учитывающий эллипсность траектории движения маятника.

При расчете азимута по алгоритмам (6) и (7), наличие перекрестной связи между каналами ЧЭ вызывает появление «широтной» методической погрешности и ее можно аппроксимировать выражением

$$\Delta \alpha_{\rm III} = k_{\rm o} \sin \phi, \qquad (8)$$

где k_o - коэффициент широтной погрешности зависит от параметров прибора и определяется экспериментально при калибровке.

Алгоритмы (6), (7) не учитывают наличия перекрестных связей между каналами ЧЭ за счет вертикальной составляющей скорости вращения Земли.

Алгоритмы, учитывающие влияния перекрестных связей, имеют вид

$$\alpha_{p3} = k\pi \pm \arctan \frac{\mu \vartheta_0 - H\psi_0}{H\vartheta_0 + \mu \psi_0}, \qquad (9)$$

$$\alpha_{p4} = k\pi \pm \arctan \left\{ \begin{cases} \frac{-(\vartheta_{0}^{2} + \psi_{0}^{2})(H\mu\omega^{2}R_{3}R_{4} - R_{1}R_{2})}{\vartheta_{0}^{2}(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2}) + \psi_{0}^{2}\mu^{2}\omega^{2}R_{4}} + \\ + \frac{\sqrt{(\vartheta_{0}^{2} + \psi_{0}^{2})^{2}(H\mu\omega^{2}R_{3}R_{4} - R_{1}R_{2})^{2} -}}{\vartheta_{0}^{2}(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2}) + \psi_{0}^{2}\mu^{2}\omega^{2}R_{4}} - \\ + \frac{-(\vartheta_{0}^{2}\mu^{2}\omega^{2}R_{4}^{2} - \psi_{0}^{2}(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2})) +}{\vartheta_{0}^{2}(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2}) + \omega^{2}(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2}))} + \\ + \frac{+(\psi_{0}^{2}\mu^{2}\omega^{2}R_{4}^{2} - \psi_{0}^{2}(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2}))}{(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2}))} + \\ + \frac{+(\psi_{0}^{2}\mu^{2}\omega^{2}R_{4}^{2} + +\vartheta_{0}^{2}(R_{1}^{2} + R_{2}^{2} + H^{2}\omega^{2}R_{3}^{2}))}{(R_{1}^{2} - R_{1}^{2} - R_{1}^{2})} \right\},$$
(10)
 rge $R_{1} = (J\omega^{2} - k)((J\omega^{2} - k)^{2} - \omega^{2}(H^{2} - \mu^{2})), R_{2} = 2H\mu\omega^{2}(J\omega^{2} - k), R_{3} = (J\omega^{2} - k)^{2} - \omega^{2}(H^{2} + \mu^{2}), R_{4} = (J\omega^{2} - k)^{2} + \omega^{2}(H^{2} + \mu^{2}). \end{cases}$

В работе проведено сравнение алгоритмов по следующим критериям: -количество информации, необходимой для расчета азимута объекта; - точность определения азимута.

С точки зрения первого критерия во всех случаях необходима информация с датчиков углов об амплитудах колебаний ЧЭ (ϑ_0, ψ_0).

Для расчета α_{p1} по выражению (6) никакой другой информации не нужно.

Для расчета α_{p2} по выражению (7) необходимо еще определить сдвиг фаз є между колебаниями ЧЭ по координатам 9 и ψ .

Исходной информацией для расчета α_{p3} по выражению (9) являются:

- амплитуды колебаний ЧЭ $\vartheta_0,\,\psi_0;$

- параметры системы ориентации - µ, D;

- широта ф местонахождения объекта.

Для расчета α_{p4} по выражению (10), кроме амплитуд колебаний ЧЭ, необходимо иметь информацию о всех параметрах системы ориентации μ , J_C, J_B, D, k, m, λ , z₀. Кроме того, возрастает объем вычислений.

С этой точки зрения первые два алгоритма предпочтительнее, в то же время они имеют методическую "широтную" погрешность. Алгоритмы (9), (10), учитывающие влияние перекрестных связей, не имеют этой погрешности.

"Широтная" погрешность увеличивается с увеличением габаритов ЧЭ, так как это приводит к увеличению момента инерции D, а следовательно, и к усилению перекрестных связей между осями подвеса ЧЭ. При уменьшении массы ЧЭ на порядок, примерно во столько же раз уменьшается и "широтная" погрешность.

С течением времени параметры системы могут изменяться, что приводит к несовпадению собственной частоты ЧЭ с частотой колебаний инерционной

массы, то есть появляется резонансная расстройка системы, следовательно, азимутальный канал должен содержать контур непрерывной подстройки в резонанс с точностью не ниже 0.1%.

Во всех алгоритмах необходимо знание географической широты местонахождения объекта (для расчета азимута по выражениям (9), (10) либо для компенсации "широтной" погрешности по алгоритмам (6), (7)).

Амплитуды колебаний ЧЭ, измеряемые датчиками углов, зависят также от географической широты, следовательно, вычислитель рассчитывает местонахождение объекта по выражению

$$\varphi_{\rm p} = \arcsin \sqrt{\frac{(2m\lambda z_0 \Omega_3)^2 - \mu^2 (\vartheta_0^2 + \psi_0^2)}{(2m\lambda z_0 \Omega_3)^2 + (D\Omega_3)^2 (\vartheta_0^2 + \psi_0^2)}}.$$
(11)

Это позволяет, во-первых, обеспечить автономность работы прибора, вовторых, расширяется информативность системы.

Функциональная схема системы ориентации представлена на рис.2. Сигналы $\Psi(t)$, $\Theta(t)$ с датчиков углов на осях подвеса ЧЭ после усиления поступают в блок предварительной обработки информации, где происходит разделение переменных (ψ , ϑ) и постоянных ($\overline{\psi}$, $\overline{\vartheta}$) составляющих сигналов. Затем эти сигналы с помощью АЦП преобразуются в цифровой код и поступают в вычислитель, который осуществляет расчет углов α , δ , γ , ϕ и формирует сигналы управления U для настройки системы в резонанс.



Рис. 2. Функциональная схема системы ориентации

В работе приведено компьютерное имитационное моделирование, в процессе которого можно полностью оценить динамические свойства системы. Современная компьютерная техника позволяет учесть большое количество факторов, влияющих на работу приборов, следовательно, компьютерное имитационное моделирование очень близко к физическому эксперименту.

Такое виртуальное экспериментальное исследование динамики азимутального канала СО осуществлено при помощи пакета МАТLAB, который содержит в своем составе инструмент визуального моделирования SIMULINK, являющийся эффективным инструментом исследования динамики сложных систем.

На рис.3 показаны характеристики азимутального канала с десятиразрядным АЦП. Наличие АЦП в каналах преобразования сигналов $\vartheta(t)$, $\psi(t)$



Рис.3.Характеристики азимутального канала с десятиразрядным АЦП

колебаний ЧЭ, приводит к появлению погрешностей квантования, которые уменьшаются с увеличением разрядности АЦП.

Все параметры системы с течением времени могут изменяться. Анализ влияния нестабильности параметров ЧЭ на точность азимутального канала показал, что изменение параметров системы в пределах до 10% слабо влияет на погрешность определения угла α. Наиболее чувствительна система к коэффициента и изменению сил вязкого трения, так как при резонансе величина амплитуды колебаний системы определяется величиной коэффициента µ сил вязкого трения. Кроме того, все погрешности увеличиваются с увеличением географической широты местонахождения Φ объекта.

С течением времени параметры ЧЭ могут изменяться, поэтому в работе рассмотрено влияние нестабильности параметров ЧЭ на точность расчета азимута и географической широты. Предельные приращения ошибок расчета азимута и широты определяются через функции чувствительности, которые характеризуют степень влияния отклонения параметров ЧЭ от их номинальных значений на точность азимутального модуля. Исследования показали, что изменение параметров системы в пределах 10% слабо влияет на погрешности расчета азимута и широты. Наиболее чувствительна система к изменению коэффициента µ момента сил вязкого трения. Зная функции чувствительности и допустимую погрешность системы, определяются требования к стабильности параметров ЧЭ.

Актуальной задачей компасных систем является обеспечение их работоспособности при поступательной и угловой вибрации, поэтому проведено исследование влияния поступательной и угловой вибрации на точность работы азимутального канала.

При наличии только поступательной вибрации основания уравнения ЧЭ имеют вид

$$J_{C} \mathscr{A} + H \mathscr{A} + \mu \mathscr{A} + k_{1} \psi = -F \cos \alpha \cos \omega t - m(\lambda + z)(\mathscr{A}_{X} - \mathscr{A}_{Z} \psi - v_{Z} \mathscr{A}); \quad (12)$$

$$J_{B} \mathscr{A} - H \mathscr{A} + \mu \mathscr{A} + k_{2} \vartheta = -F \sin \alpha \cos \omega t - m(\lambda + z)(\mathscr{A}_{Y} - \mathscr{A}_{Z} \vartheta - v_{Z} \mathscr{A}).$$

При решении системы уравнений (12) использовался метод последовательных приближений, то есть

$$\psi(t) = \psi_0(t) + \varepsilon \psi_1(t) + \varepsilon^2 \psi_2(t) + \dots$$
(13)
$$\vartheta(t) = \vartheta_0(t) + \varepsilon \vartheta_1(t) + \varepsilon^2 \vartheta_2(t) + \dots ,$$

где є - малый параметр.

Слагаемые $\psi_1(t), \vartheta_1(t)...$ обусловлены малыми нелинейными членами $m(\lambda + z)(\mathscr{X}_Z \psi - v_Z \mathscr{Y}), m(\lambda + z)(\mathscr{X}_Z \vartheta - v_Z \mathscr{Y})$ и представляют собой малые поправки к основным отклонениям ЧЭ $\psi_0(t), \vartheta_0(t)$.

Для определения основных отклонений ЧЭ $\psi_0(t)$, $\vartheta_0(t)$ была рассмотрена система линейных уравнений, решение которой найдено по виду правых частей

$$\psi_0(t) = A\cos\omega t + B\sin\omega t + A_1\cos qt + B_1\sin qt,$$
(14)
$$\vartheta_0(t) = M\cos\omega t + N\sin\omega t + M_1\cos qt + N_1\sin qt.$$

где амплитуды A₁, B₁, M₁, N₁, обусловленные поступательной вибрацией основания имеют вид

$$\begin{split} A_{1} &= \frac{\Delta A_{1}}{\Delta_{1}}, \ B_{1} = \frac{\Delta B_{1}}{\Delta_{1}}, \ M_{1} = \frac{\Delta M_{1}}{\Delta_{1}}, \ N_{1} = \frac{\Delta N_{1}}{\Delta_{1}}, \\ \Delta_{1} &= (J_{C}q^{2} - k_{1})^{2}(J_{B}q^{2} - k_{2})^{2} - 2H^{2}q^{2}(J_{C}q^{2} - k_{1})(J_{B}q^{2} - k_{2}) + \\ \mu^{2}q^{2}[(J_{C}q^{2} - k_{1})^{2} + (J_{B}q^{2} - k_{2})^{2}] + q^{4}(H^{2} + \mu^{2}), \\ \Delta A_{1} &= -m\lambda a'q^{2}((J_{C}q^{2} - k_{1})^{2}(J_{B}q^{2} - k_{2})^{2} - H^{2}q^{2}(J_{B}q^{2} - k_{2}) + \\ &\quad + \mu_{2}^{2}q^{2}(J_{C}q^{2} - k_{1})), \\ \Delta B_{1} &= m\lambda a'\mu q^{3}((J_{B}q^{2} - k_{2})^{2} + (H^{2} + \mu^{2})q^{2}) + \\ &\quad + m\lambda b'Hq^{3}((J_{B}q^{2} - k_{2})(J_{C}q^{2} - k_{1}) - (H^{2} + \mu^{2})q^{2}), \\ \Delta M_{1} &= -m\lambda a'H\mu q^{4}((J_{B}q^{2} - k_{2}) + (J_{B}q^{2} - k_{2}) + \\ &\quad + m\lambda b'q^{2}(-(J_{C}q^{2} - k_{1})^{2}(J_{B}q^{2} - k_{2}) - q^{2}(\mu^{2} + H^{2})) + \\ &\quad + m\lambda b'\mu q^{3}((J_{C}q^{2} - k_{1})(J_{B}q^{2} - k_{2}) - q^{2}(\mu^{2} + H^{2})) + \\ &\quad + m\lambda b'\mu q^{3}((J_{C}q^{2} - k_{1})^{2} - q^{2}(\mu^{2} + H^{2})). \end{split}$$

Наличие нелинейных членов приводит к тому, что поступательная вибрация основания вызывает колебания ЧЭ с одинарной, двойной частотой возмущающего воздействия и комбинацией частот ω и q. Так как, отклонения $\psi_1(t)$ и $\vartheta_1(t)$ малы, то основные информационные колебания ЧЭ можно вычислить по выражениям (14, 15).

Таким образом, при наличии поступательной вибрации основания на полезные информационные колебания ЧЭ с частотой ω , по амплитудным значениям которых рассчитывается азимут объекта, накладываются колебания с частотами, зависящими от частоты вибрации основания (рис.4), что искажает информационное полезное движение ЧЭ и снижает точность определения α . На рис.4 показан сигнал $\vartheta(t)$, измеряемый датчиком угла, установленным на оси подвеса ЧЭ. Он содержит информационный сигнал с частотой ω и помеху, зависящую от частоты вибрации q.

Сигнал $\vartheta^*(t)$ на выходе полосового фильтра представляет собой практически гармонические колебания, происходящее с одной информационной



Рис.4. Характеристики азимутального канала с полосовым фильтром при частоте q= 5 с⁻¹

частотой ω , как и на неподвижном основании.

Параметры прибора следует выбирать таким образом, чтобы частота ω собственных колебаний ЧЭ нахолилась вне диапазона частот поступательной вибрации основания. Для снижевлияния поступания тельной вибрации основания на точность расчета азимута необходимо осуществить фильтрацию выходных сигнадатчиков, ЛОВ измеряющих угловые колебания ЧЭ вокруг его осей подвеса таким об-

разом, чтобы максимально ослабить составляющие, происходящие с частотами вибрации основания и выделить полезные колебания с частотой ω. Это позволит обеспечить расчет азимута с заданной точностью в условиях поступательной вибрации основания.

Уравнения движения азимутального канала при наличии угловой вибрации основании имеют вид

$$J_{C} \psi + H \psi + \mu \psi + k_{1} \psi = -F \cos \alpha \cos \omega t + c_{1} \gamma + \mu_{1} \psi - J_{C} \psi + c_{1} \alpha + J_{C} \psi + D_{1} \psi$$

Считаем, что угловые колебания происходят по гармоническому закону, то есть $\gamma = \gamma_0 \sin \chi t$, $\delta = \delta_0 \sin \chi t$, $\beta = \beta_0 \sin \chi t$.



Рис.5. Характеристики азимутального канала при угловой вибрации основания с частотой

$$\chi = 5c$$

Возмущения, обусловленные угловой вибрацией основания, малы. Следовательно, и анализ движения ЧЭ проведен методом последовательных приближений, как и для поступательной вибрации.

При угловой вибрации основания (рис.5) на полезные информационные сигналы $\vartheta(t)$, происходящие с частотой ω , накладываются колебания с частотой χ угловой вибрации, которые вызывают погрешность определения азимута.

На выходе полосовых фильтров $\vartheta^*(t)$ остаются

только информационные сигналы с частотой ω (рис.5), на основании которых рассчитывается азимут α .

<u>В четвертой главе</u> рассмотрены схемы высокочастотных азимутальных модулей.

Время определения азимута в рассмотренной ранее схеме азимутального модуля составляет единицы минут, что обусловлено низкой собственной частотой ЧЭ. Для его уменьшения необходимо увеличивать частоты собственных колебаний ЧЭ. Кроме того для получения наибольшей реакции системы на переменные моменты сил Кориолиса необходимо обеспечить высокую добротность ЧЭ, что может быть достигнуто при исполнении колебательной системы в «монолитном» исполнении. Эти задачи можно решить изменив схему системы ориентации, то есть выполнить маятник и ЧЭ как два самостоятельных устройства. Двухосный маятник, установленный в корпусе с помощью подвеса, выполняет функцию геометрического построителя вертикали. На маятнике расположен ЧЭ азимутального модуля, с которого снимаются сигналы, используемые для вычисления азимута.

В работе исследованы высокочастотные азимутальные модули двух видов: на основе LL-гироскопа (поступательное входное и выходное движение элементов ЧЭ) и LR-гироскопа (поступательное входное и угловое выходное движение элементов ЧЭ), которые могут быть реализованы на основе микро-



Рис.6. Принципиальная схема азимутального модуля на основе LR-гироскопа

механической колебательной системы, что посущественно зволяет уменьшить массогабаритные характеристики системы.

Схема ЧЭ азимутального модуля на основе LR-гироскопа представлена на рис.6.

ЧЭ состоит из двух одинаковых инерционных масс 1,2, установленных на виброприводе 4. Последний сообщает инерционным массам противофазные поступательные колебания вдоль оси Z.

Внутренняя рамка 3 связана упругими элементами 5 с наружной рамкой 6, которая установлена в корпусе также с помощью упругих элементов 7.

В результате вращения Земли и поступательных колебаний инерционных масс возникают силы Кориолиса, изменяющиеся по гармоническому закону, что приводит к появлению угловых колебаний ЧЭ вокруг внутренней и наружной осей подвеса. Амплитуды этих колебаний измеряются датчиками 8, 9, установленными на осях подвеса.

Горизонтирование ЧЭ может быть осуществлено геометрически, тогда ЧЭ устанавливается на двухкоординатном маятнике, либо аналитически, в этом случае направление вертикали рассчитывается по сигналам акселерометров, установленных на объекте. При геометрическом горизонтировании ЧЭ уравнения движения азимутального модуля имеют вид

 $J_{C}\psi + D \mathscr{D}_{B} + \mu_{1}\psi + c_{1}\psi = -4m(\lambda + z)\mathscr{A}_{C}\cos\alpha - 4m(\lambda + z)\mathscr{A}_{D}\Omega_{B} - 4m(\lambda + z)\mathscr{A}_{C}\psi$ $J_B \mathscr{G} - D \mathscr{G} \Omega_B + \mu_2 \mathscr{G} + c_2 \vartheta = -4m(\lambda + z) \mathscr{E} \Omega_{\Gamma} \sin \alpha + 4m(\lambda + z) \mathscr{E} \mathscr{G} \Omega_B - 4m(\lambda + z) \mathscr{E} \mathscr{G}$ $m_{x} + v_{x} + kz = N(t),$ (17)

где обозначено

BV

 $J_{C} = J_{Y1} + J_{Y} + 4m\lambda^{2} + 4m\lambda z(t) = J_{Y1} + J_{Y} + 4m[\lambda + z(t)] \cdot \lambda;$ $J_{B} = J_{X} + 4m\lambda^{2} + 4m\lambda z(t) = J_{X} + 4m[\lambda + z(t)] \cdot \lambda;$ $D = -J_{\rm Z} + J_{\rm Y} + J_{\rm X} + 4m\lambda^2 + 8m\lambda z(t) \, . \label{eq:D}$

Решая систему уравнений методом последовательных приближений, можно сделать вывод, что амплитуды колебаний изменяются по гармоническому закону с частотой, равной частоте о колебаний инерционных масс m_1, m_2 и более высокими частотами. Следовательно, общее движение ЧЭ азимутального модуля представляет собой колебания вокруг его осей подвеса с частотой ω , на которые накладываются более высокочастотные колебания с частотами, кратными частоте ω . Амплитуды этих колебаний существенно меньше амплитуд основных информационных колебаний. Кроме того, имеется смещение положения динамического равновесия колебаний ЧЭ на постоянную величину ϑ_C (рис.7) (или ψ_C), что обусловлено нелинейными членами уравнений (17).



Рис.7. Характеристики ЧЭ с полосовым фильтром при $\omega_0 = 6280c^{-1}$

Информация об азимуте объекта, необходимая для расчета, содержится в амплитудах колебаний ЧЭ с частотой ω , все остальные сигналы являются помехами, которые отфильтровываются полосовыми фильтрами, настроенными на частоту вибропривода. Постоянные составляющие ψ_C , ϑ_C также устраняются фильтрацией выходных сигналов ЧЭ на частоте вибровозбуждения инерционных масс.

При геометрическом способе горизонтирования ЧЭ алгоритмы определения азимута по форме совпадают с алгоритмами (6), (7), следовательно, имеют те же особенности, что и для низкочастотного азимутального модуля.

Компьютерное моделирование показало, что время определения азимута мало, так при частоте колебаний инерционных масс $\omega = 6280 \text{ c}^{-1}$, оно составляет 0.1сек, при частоте 628 с⁻¹ - 1 сек.

В результате технологических погрешностей направление поступательных колебаний инерционных масс может быть отклонено от оси ОZ ЧЭ. В этом случае, кроме полезной скорости & появляются составляющие &, &

скоростей колебаний инерционных масс вдоль перекрестных осей ОХ и ОҮ. Из-за наличия технологических погрешностей на полезные информационные колебания ЧЭ накладываются колебания с удвоенной частотой 2ω, которые отфильтровываются полосовым фильтром, настроенным на частоту вибропривода. При этом появляется смещение положения динамического равновесия колебаний ЧЭ. Электрические сигналы, пропорциональные этим величинам, являются постоянными или медленно меняются, следовательно, они также отфильтровываются. Кроме того, существуют колебания ЧЭ с рабочей частотой ω прибора, но амплитуды этих колебаний не зависят от азимута объекта, а определяются технологическими погрешностями. Это вызывает погрешность расчета азимута, которая определяется при настройке прибора и в расчетном значении азимута учитывается.

В работе исследована динамика двухмассового ЧЭ LR-типа при угловой и поступательной вибрации основания, влияние которых устраняется фильтрацией выходных сигналов ЧЭ на частоте ω вибровозбуждения.

Микромеханические инерциальные датчики (МИД) с поступательными входными и выходными и колебаниями ЧЭ (то есть МИД LL-типа) имеют более высокую разрешающую способность по сравнению с МИД, которые используют в своих ЧЭ угловые колебания. Схема такого плоского ЧЭ ази-



Рис. 8. Схема ЧЭ LL-типа

мутального модуля представлена на рис.8.

При геометрическом построении плоскости горизонта ЧЭ устанавливается на маятниковой платформе, которая осуществляет его горизонтирование. Вибропривод, расположенный на платформе маятника, сообщает всему ЧЭ поступательные гармонические колебания z(t) вдоль оси OZ.

ЧЭ состоит из инерционной массы 1, которая с помощью упругих элементов 2 установлена в рамке 3. Рамка 3 подвешена в корпусе 4 с помощью упругих элементов 5.

Силы Кориолиса, воз-

никающие в результате вращения Земли и поступательных колебаний ЧЭ со скоростью $\mathcal{L}(t)$, изменяются по гармоническому закону с частотой ω вибровозбудителя, что приводит к появлению поступательных колебаний инерци-

онной массы вдоль осей ОХ и ОҮ. Амплитуды x_a , y_a этих колебаний измеряются датчиками перемещения 6,7 и поступают в вычислительное устройство для расчета азимута α и широты φ и формирования сигнала U_{PH} резонансной настройки системы.

Большая величина собственной частоты и малая масса подвижной системы повышает ударопрочность конструкции, позволяет применить в качестве вибровозбудителя электростатические либо пьезоэлектрические привода, а в качестве датчиков, измеряющих выходные параметры x, y - высокочувствительные емкостные датчики перемещения.

Уравнения движения ЧЭ LL-типа имеют вид

$$m_{1} \mathscr{K} + \mu_{x} \mathscr{K} + k_{2}x - 2m\Omega_{B} \mathscr{K} = 2m_{1}(\mathscr{K} + cq\cos qt)\Omega_{\Gamma}\sin \alpha + + 2m_{3}\Omega_{\Gamma}(\delta\sin\alpha - \gamma\cos\alpha) - 2m_{1}(\mathscr{K} + cq\cos qt)\Omega_{B}\delta + m_{1}g\gamma - m_{1}aq^{2}\sin qt; m_{3} \mathscr{K} + \mu_{y} \mathscr{K} + k_{1}y + 2m\Omega_{B} \mathscr{K} = 2m(\mathscr{K} + cq\cos qt)\Omega_{\Gamma}\cos\alpha - - 2m_{3}\Omega_{\Gamma}(\delta\sin\alpha + \gamma\cos\alpha) - 2m_{1}(\mathscr{K} + cq\cos qt)(\Omega_{B} + \Omega_{\Gamma}\gamma\sin\alpha)\gamma - - mg\delta - mbq^{2}\sin qt,$$
(18)

где a,b,c,q – соответственно амплитуды и частота поступательной вибрации объекта; $m_1 = m + m_p$.

Исследования показали, что инерционная масса совершает колебания вдоль осей подвеса с частотой вибровозбудителя, а амплитуды этих колебаний зависят от азимута объекта, следовательно, измерив их, можно рассчитать азимут.

Для увеличения амплитуд колебаний инерционной массы необходимо осуществлять резонансную настройку системы. В этом случае амплитуды колебаний инерционной массы определяются выражениями

$$x_{a} = \frac{f(m_{1}\mu\sin\alpha + mH_{1}\cos\alpha)}{\omega(H_{1}^{2} + \mu^{2})}; \qquad y_{a} = \frac{f(m\mu\cos\alpha - m_{1}H_{1}\sin\alpha)}{\omega(H_{1}^{2} + \mu^{2})}, \quad (19)$$

где $f = 2z_0 \omega \Omega_3 \cos \varphi$.

Выражение $H_1 = 2m\Omega_3 \sin \phi$ определяет перекрестные связи между осями подвеса инерционной массы за счет вертикальной составляющей скорости вращения Земли. Если пренебречь этой связью, то алгоритм определения азимута объекта примет вид

$$\alpha_{\rm pl} = k\pi \pm \arctan\frac{x_{\rm a}}{y_{\rm a}} \cdot d, \tag{20}$$

где $d = m/m_1$ - коэффициент инерционной асимметрии ЧЭ.

Однако из выражений (19) видно, что амплитуды колебаний инерционной массы вдоль каждой ее оси подвеса зависят как от sin, так и от cos угла α , следовательно, алгоритм определения азимута получается в виде

$$\alpha_{p2} = k\pi \pm \operatorname{arctg} \frac{(x_a \mu - y_a H_1)}{(x_a H_1 + y_a \mu)} \cdot d.$$
(21)

Полученный алгоритм учитывает наличие перекрестных связей между осями подвеса инерционной массы, однако для его использования необходимо знать географическую широту φ . При точной настройке системы в резонанс погрешности $\Delta \alpha_{p2}$ алгоритма (21) равны нулю при всех значениях географической широты φ местонахождения объекта. Погрешность $\Delta \alpha_{p1}$ алгоритма (20) увеличивается с увеличение широты.

При резонансной расстройке системы имеются погрешности расчета α по обоим алгоритмам. Следовательно, ЧЭ LL- типа, как и любая система, работающая в резонансном режиме, должна иметь систему автоматической подстройки в резонанс.

Нестабильность параметров ЧЭ также вызывает погрешности расчета азимута, наибольшее влияние оказывает изменение коэффициента сил вязкого трения.

Поступательная и угловая вибрации основания искажают полезное информационное движение ЧЭ LL-типа. Устранение их влияния на высокочастотный азимутальный модуль достигается фильтрацией выходных сигналов ЧЭ на рабочей частоте прибора.

В работе для обеих схем высокочастотных модулей получены алгоритмы определения азимута при аналитическом горизонтированиии ЧЭ. В этом случае для расчета α необходима информация об углах δ , γ отклонения объекта от плоскости горизонта, которая поступает от горизонтального канала, реализованного с помощью акселерометров.

Основные результаты и выводы:

1. Рассмотрена возможность построения малогабаритного быстродействующего азимутального модуля, работающего при угловой и поступательной вибрации основания.

2. Предложены схемы азимутальных модулей с тремя типами чувствительных элементов: низкочастотный ЧЭ LR-типа, высокочастотные ЧЭ LRтипа и LL-типа.

3. Определены амплитуды колебаний ЧЭ, обусловленные силами Кориолиса, возникающими при поступательных колебаниях инерционной массы. Показано, что ЧЭ представляет собой резонансную колебательную систему, повышение чувствительности которой достигается при уменьшении сил вязкого трения и совпадении частоты возбуждения инерционной массы с частотой собственных колебаний ЧЭ.

4. Получены алгоритмы расчета азимута и географической широты с учетом и без учета перекрестных связей между осями ЧЭ при геометрическом и аналитическом способах его горизонтирования.

5. Проведено сравнение алгоритмов и определены наиболее оптимальные с точки зрения точности и информационной обеспеченности. 6. Получены соотношения, позволяющие выработать требования к стабильности параметров системы, исходя из заданной точности определения азимута и широты.

7. Определено влияние поперечных составляющих скорости поступательных колебаний инерционного тела, обусловленных технологическими погрешностями, на динамику ЧЭ.

8. Показано, что угловая и поступательная вибрации основания искажают полезное информационное движение ЧЭ. Предложен способ обработки выходных сигналов ЧЭ, устраняющий влияние вибрации на расчет азимута и широты.

9. Показано, что повышение быстродействия системы достигается при увеличении собственной частоты ЧЭ.

10. Проведено имитационное математическое моделирование азимутального модуля с применением программных средств MathLAB и SIMULINK, которое наглядно показало особенности динамики ЧЭ.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

- 1. Нестеренко Т.Г., Плотникова И.В. Измеритель направления плоскости географического меридиана// «ХХІІІ Гагаринские чтения»: Тез. докл. молодежной научной конференции. МРГТУ-МАТИ,1997, Часть 3.- с.79-80.
- Копытов В.И., Нестеренко Т.Г., Плотникова И.В Устройство ориентирования объекта в пространстве//Динамика систем, механизмов, машин// II Международная научно-техническая конференция: Тез.докл. Омск, Ом-ГТУ, 1997.- с.40.
- 3. Kopytov V.I., Nesterenko V.P., Nesterenko T.G., Plotnikova I.V. Formation of fast compass principle / The Second Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS 98) Tomsk, TPU, 1998.- p.22.
- 4. Нестеренко В.П., Нестеренко Т.Г., Плотникова И.В. Измеритель направления географического меридиана. Патент на изобретение № 2150087 от 15.06.1998, 8с.
- 5. Копытов В.И., Нестеренко Т.Г., Плотникова И.В. Быстродействующий миниатюрный компас //Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации// Юбилейная научно-техническая конференция. Москва, МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1998.-с.71-78.
- 6. Nesterenko T.G., Plotnikov I.A., Plotnikova I.V. Influence of class relationships to high-speed compass accuracy//The 3th Internation Symposium «SIBCONVERS-99», Tomsk, TSUCSR, 1999, v.1, p. 171-173.
- Нестеренко Т.Г., Плотников И.А., Плотникова И.В. Сравнительный анализ алгоритмов функционирования быстродействующего малогабаритного компаса//Новейшие технологии в приборостроении//Научные труды Российской научно-технической конференции. Томск, ТПУ. Часть.1, 1999.- с.48-50..
- 8. Нестеренко Т.Г., Плотникова И.В. Влияние наклонов основания на точность вибрационного компаса. // Измерение, контроль, информатизация//

Материалы международной научно-технической конференции, Барнаул, 2000.- с.12-14.

- Нестеренко В.П., Нестеренко Т.Г., Плотников И.А., Плотникова И.В. Малогабаритная система ориентации, проблемы и принципы построения // Современное состояние, проблемы навигации и океанографии (HO-2001)// 4-ая Российская научно-техническая конференция, СПб, 2001, т.1,с.128-131.
- 10. Нестеренко В.П., Нестеренко Т.Г., Плотников И.А., Плотникова И.В. Принцип построения и исследования быстродействующего вибрационного компаса // Радиолокация, навигация, связь //VII Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 2001, т.3, с. 1500-1505.
- 11. Nesterenko T.G., Plotnikov I.A., Plotnikova I.V. Static object orientation mini system // The 5th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS-2001), Томск, TPU, 2001, v.1. p.39-42.